

**PROCEDE DE MESURE DE PARAMETRES PHYSIQUES D'AU MOINS
UNE PHASE AUX DIMENSIONS MICROMETRIQUES OU
NANOMETRIQUES DANS UN SYSTEME COMPOSITE.**

5 La présente invention a pour objet un procédé de détermination d'au moins un paramètre mécanique d'au moins un matériau dans un système composite comprenant au moins deux phases distinctes. Le procédé s'applique plus particulièrement au cas où la phase à caractériser est structurée à l'échelle micrométrique ou nanométrique, et au moins un autre matériau constitue un substrat
10 ou une matrice. Par exemple, le procédé s'applique à la caractérisation d'une couche mince déposée sur un substrat ou d'inclusions, filaments ou fibres dans une matrice.

 L'expression « paramètres mécaniques » est utilisée ici pour indiquer aussi bien des propriétés mécaniques et thermomécaniques, telles que le module d'Young, le coefficient de Poisson, le coefficient de dilatation thermique etc., que des
15 états de déformation et/ou de contrainte.

 La connaissance des propriétés mécaniques d'un système ou dispositif physique permet d'en optimiser le fonctionnement. Tout matériau quel qu'il soit est soumis à des contraintes externes et il faut pouvoir connaître sa résistance à de telles contraintes. Il est donc important de connaître au mieux les propriétés élastiques
20 d'un système et en particulier celles d'une ou plusieurs couches disposées à la surface d'un substrat. Les propriétés de cette couche (ou de ces couches considérées comme un sous-système) diffèrent en effet notablement des propriétés des couches prises individuellement.

 Les propriétés élastiques des matériaux interviennent dans de nombreux domaines d'applications : revêtement de pièces mécaniques, déformation de structure, ... Elles jouent un rôle de plus en plus important dans la réalisation de circuits électroniques : la taille des dispositifs diminuant, les contraintes générées à l'interface des différentes parties du dispositif sont d'autant plus importantes.

 Les méthodes déjà développées pour mesurer les constantes
30 d'élasticité et les coefficients de dilatation sont généralement réalisées à une échelle macroscopique.

 Les méthodes traditionnelles sont :

 A) déflexion, déformation d'éprouvettes macroscopiques ou de taille plus réduite : voir par exemple : Measurement of elastic modulus, Poisson ratio, and
35 coefficient of thermal expansion of on-wafer submicron films. Zhao, Jie-Hua; Ryan,

Todd; Ho, Paul S.; McKerrow, Andrew J.; Shih, Wei-Yan. PRC/MER2.206,
Journal of Applied Physics (1999), 85(9), 6421-6424,

- ou bien: Elastic modulus measurements by three methods on a
2-D laminated continuous fiber-reinforced ceramic matrix composite. Gonczy, S. T.;
5 Jenkins, M. G Ceramic Transactions (2000), 103(Advances in Ceramic-Matrix
Composites V), 541-547,

- ou bien encore: Analysis of residual stress in cubic boron nitride
thin films using micromachined cantilever beams. Cardinale, G. F.; Howitt, D. G.;
McCarty, K. F.; Medlin, D. L.; Mirkarimi, P. B.; Moody, N. R. Diamond and Related
10 Materials (1996), 5(11), 1295-1302

B) Ondes électroacoustiques : par exemple Hardness and Young's
modulus of high-quality cubic boron nitride films grown by chemical vapor
deposition. Jiang, X.; Philip, J.; Zhang, W. J.; Hess, P.; Matsumoto, S Journal of
Applied Physics (2003), 93(3), 1515-1519, ou bien Thin-film elastic-property
15 measurements with laser-ultrasonic SAW spectrometry, Hurley, D. C. ; Tewary, V.
K.; Richards, A. J Thin Solid Films (2001), 398-399 326-330

C) nanoindentation par exemple : Determination of mechanical film
properties of a bilayer system due to elastic indentation measurements with a spherical
indenter.

20 Chudoba, T.; Schwarzer, N.; Richter, F.; Beck, U. Thin Solid Films
(2000), 377-378 366-372, ou bien, Hardness and elastic modulus measurements of
AlN and TiN sub-micron thin films using the continuous stiffness measurement
technique with FEM analysis. Rawdanowicz, T. A.; Sankar, J.; Narayan, J.; Godbole,
V. Materials Research Society Symposium Proceedings (2000), 594(Thin Films--
25 Stresses and Mechanical Properties VIII), 507-512.

Il existe également des méthodes plus récentes pour mesurer les
propriétés mécaniques de petits objets, par exemple la microscopie à force atomique
(‘AFM’) décrite par exemple dans :

Measurements of elastic properties of ultra-thin diamond-like carbon
30 coatings using atomic force acoustic microscopy. Amelio, S.; Goldade, A. V.; Rabe,
U.; Scherer, V.; Bhushan, B.; Arnold, W Thin Solid Films (2001), 392(1), 75-84.

L'invention a pour but de mesurer un ou plusieurs paramètres
mécaniques, notamment les constantes élastiques et les coefficients de dilatation
thermique d'un matériau et les contraintes que ce matériau génère lorsqu'il est associé
35 à d'autres. Sa spécificité est de pouvoir mesurer de tels paramètres dans des conditions
proches de leur condition d'applications : couches minces ou épaisses, couches

inhomogènes, 'couches' discontinues ou précipités/inclusions, fibres ou filaments, boîtes (terme plus spécifique aux matériaux semi-conducteurs où les charges sont localisées dans ces boîtes constituées d'un second matériau différent du substrat). Les connaissances actuelles ne permettent pas d'affirmer que les paramètres mesurés
5 macroscopiquement peuvent être utilisés dans des structures de petites dimensions, c'est à dire micrométriques et nanométriques.

L'idée de base de l'invention consiste à utiliser un phénomène bien connu, mais qui est généralement considéré comme un inconvénient que l'on cherche à éviter ou à négliger : dans un échantillon présentant au moins une dimension
10 suffisamment faible, par exemple à l'échelle micrométrique ou sub-micrométrique, du fait de la proximité de la surface libre, les contraintes accumulées dans le dispositif initial sont relaxées (voir les documents précités de Perovic, D., Weatherly G. and D. Houghton Phil. Mag. 64 (1991)). Selon l'invention, il n'est pas nécessaire d'effectuer des mesures directes sur le matériau à caractériser (ce qui n'est pas toujours possible
15 ou aisé) : la mesure des paramètres de déformation du substrat ou matrice, dont l'origine est le relâchement des contraintes dans l'échantillon, permet de remonter aux paramètres de la phase structurée à l'échelle micrométrique ou nanométrique. Des mesures éventuelles effectuées sur cette phase, lorsqu'elles sont techniquement possibles, apportent un complément d'information mais ne sont pas, en général,
20 indispensables.

Par « paramètre de déformation » on entend aussi bien les déformations pures, couramment indiquées par le symbole ϵ et qui, du point de vue microscopique, correspondent à des variations des paramètres cristallins, que les rotations locales des axes cristallins, indiquées par le symbole β .

25 L'invention porte donc sur un procédé pour la détermination d'au moins un paramètre mécanique d'au moins un matériau dans un système composite comprenant au moins deux phases distinctes, caractérisé en ce qu'il comporte :

(a) la réalisation d'au moins un échantillon comportant une première partie d'une première phase et une deuxième partie d'une deuxième phase, la
30 deuxième partie étant constituée du matériau à caractériser, l'échantillon ayant au moins une dimension suffisamment faible pour permettre un relâchement des contraintes dans ledit échantillon ;

(b) la mesure, sur ledit échantillon d'au moins un paramètre de déformation d'au moins ladite première phase, en correspondance d'une pluralité de
35 points situés à des distances différentes d'une interface entre lesdites première et deuxième phase ; et

(c) la détermination, à partir au moins dudit paramètre de déformation, d'au moins un paramètre mécanique de ladite deuxième phase.

Selon des modes de réalisation particuliers :

- Ledit procédé comporte:

5 i. la réalisation d'une pluralité d'échantillons qui diffèrent entre eux pour au moins une propriété géométrique ;

ii. la mise en œuvre de l'étape b. sur chacun desdits échantillons ;

et

10 iii. l'utilisation dans l'étape c. des mesures effectuées sur ladite pluralité d'échantillons.

- L'étape b. est répétée à au moins deux températures différentes pour au moins un desdits échantillons.

- L'étape c. comporte :

15 i. la modélisation du relâchement des contraintes dans ledit échantillon (L) en utilisant une première estimation d'au moins une propriété mécanique du matériau de ladite deuxième phase (B);

ii. la comparaison des résultats des mesures de l'étape b. avec ceux de ladite modélisation ;

20 iii. la modification de ladite estimation d'au moins une propriété mécanique du matériau de ladite deuxième phase et la réitération des sous-étapes i. à iii. jusqu'à la minimisation de l'écart entre lesdits résultats des mesures et de la modélisation.

25 Dans ce contexte, le terme « modélisation » couvre aussi bien les simulations numériques que les modèles analytiques approchés. Avantageusement, on peut utiliser une simulation numérique par éléments finis.

30 - Ledit système composite est choisi parmi : un substrat présentant sur sa surface une couche continue, un substrat présentant sur sa surface des îlots ou des bandes de métallisation, une couche avec une zone incluse dans le substrat, un transistor, une couche à l'intérieur d'un substrat, une matrice contenant des inclusions, des fibres ou des filaments.

- Ledit échantillon comporte au moins une dimension à l'échelle micrométrique ou nanométrique.

35 - Ledit échantillon est une lame ayant deux faces sensiblement parallèles et disposées sensiblement perpendiculairement par rapport à l'interface entre lesdites première et deuxième phase, auquel cas l'étape b. est avantagement répétée pour une pluralité de lames d'épaisseurs différentes.

- Selon un mode de réalisation alternatif, ledit échantillon est une lame disposée selon un angle par rapport à l'interface entre lesdites première et deuxième phase, auquel cas l'étape b. est avantageusement répétée pour une pluralité de lames disposées selon des angles différents par rapport à l'interface entre lesdites première et deuxième phase.

- Selon un autre mode de réalisation alternatif ledit échantillon est une lame en forme de coin, présentant deux faces formant un angle entre elles, auquel cas l'étape b. est avantageusement répétée pour une pluralité de lames présentant deux faces formant entre elles des angles différents.

10 - Les mesures prévues à l'étape b. sont effectuées par diffraction d'un faisceau électronique convergent.

- L'étape b. comporte l'observation de lignes de Holz pour au moins un plan cristallographique de ladite première phase (A) et la détermination d'au moins un paramètre parmi : la largeur des dites lignes de Holz, leur position et leur structure interne.

- L'étape b. comporte la détermination d'au moins la largeur d'au moins certaines desdites lignes de Holz et le calcul, pour chacune d'entre elles, d'une rotation maximale β_{\max} le long de l'axe du faisceau d'électrons.

20 - L'étape c. met en oeuvre le tracé d'au moins une courbe représentant une dite rotation maximale en fonction de la distance par rapport à l'interface entre lesdites première et deuxième phase.

Selon un mode de réalisation préféré, l'étape c. met également en oeuvre par simulation le tracé de courbes représentant la rotation maximale β_{\max} en fonction de la distance par rapport à l'interface entre lesdites première et deuxième phase pour des valeurs possibles du module d'Young et/ou du coefficient de Poisson du matériau de ladite deuxième phase, ainsi que la minimisation de l'écart entre les courbes simulées et les courbes expérimentales pour déterminer le module d'Young et/ou du coefficient de Poisson du matériau de ladite deuxième phase.

30 L'invention sera mieux comprise à la lecture de la description ci-après, en liaison avec les dessins dans lesquels :

- les figures 1a à 1f illustrent différentes configurations du dispositif à étudier : couche simple pour la figure 1a, bandes de métallisations ou îlots pour la figure 1b, couche avec zone incluse dans le substrat pour la figure 1c, transistor pour la figure 1d, couche mince à l'intérieur d'un substrat pour la figure 1e et fibres dans une matrice pour la figure 1f. D'une manière générale, on indique par A le substrat ou

matrice et par B la phase aux dimensions micrométriques ou nanométriques à caractériser.

- La figure 2a et 2b représentent une vue en coupe d'un transistor ayant un substrat en silicium Si, surmonté d'une couche de NiSi d'épaisseur $e = 20$ nm et d'une couche de Si_3N_4 . Un contact en tungstène constitue le contact D de drain. La zone analysée (figure 2b) est pointée par la flèche F. La lame mince représentée à la figure 2b présente une épaisseur t (que l'on peut faire varier). Le faisceau incident moyen des électrons pour les clichés "CBED" (direction z_0) est pris selon l'axe y_2 qui fait un angle γ avec l'axe y_1 normal à la lame. Les directions et les axes cristallographiques correspondant sont illustrés à la figure 2b. CBED est l'acronyme de « diffraction d'électrons à faisceau convergent », Convergent Beam Electron Diffraction en langue anglaise.

- La figure 3a est un montage de photos illustrant cinq des digrammes de diffractions "CBED" choisis parmi une cinquantaine d'images réalisées effectivement, selon une droite perpendiculaire à la surface (direction - z_2), à une distance de 155 nm du contact D de drain. Pour chaque diagramme, on indique la distance - z_2 (en nanomètres) par rapport à la surface du substrat (interface avec la couche mince) et l'angle $\Delta\theta$ mesuré, la courbe de la figure 3b représentant l'évolution de l'angle $\Delta\theta$ calculé en fonction de - z_2 .

- La figure 4a montre un cliché de diffraction « CBED » pris suivant un axe de zone [230] dans le silicium non contraint, à une profondeur importante $z_2 = 300$ nm ($x_2 // [3, -2, 0]$, $y_2 // [2, 3, 0]$, $z_2 // [001]$).

- La figure 4b est le cliché 4a sur lequel on a ajusté des lignes de Holz positionnées par le logiciel "jems". La position de ces lignes permet de déterminer avec précision l'angle de demi-convergence du faisceau incident et la tension d'accélération (la méthode est ici similaire à celle utilisée dans le projet "STREAM").

- La figure 5a est un cliché CBED en axe de zone [230] dans le silicium déformé (diagramme « CBED » de type c pris à la profondeur $z_2 = 140$ nm).

- Sur la figure 5b, on a superposé à ce cliché des lignes issues de 3 simulations avec le logiciel "jems" :

- le premier système de lignes représente la simulation du cliché de diffraction d'un cristal de silicium parfait désorienté de $+\theta_{\max}$ par rapport à l'axe $x_2 // [3-20]$;

▪ le deuxième système de lignes représente la simulation du cliché de diffraction d'un cristal de silicium parfait désorienté de $-\theta_{\max}$ par rapport à l'axe $x_2// [3-20]$;

5 ▪ le troisième système de lignes (en pointillées) représente la simulation du cliché de diffraction du cristal parfait non désorienté. On note par $\Delta\theta$ l'angle $2\theta_{\max}$.

10 - Les figures 6a à 6d illustrent la faisabilité de minimiser les coefficients d'élasticité du matériau. 3 paramètres ont été minimisés manuellement par essais/erreurs : la température de cohérence T_0 (température fictive où les deux matériaux seraient cohérents), le module d'Young E et les coefficients de Poisson ν .

15 Les carrés représentent les mesures expérimentales de l'angle $\Delta\theta$. Les courbes avec de nombreux points sont obtenues à partir des simulations par éléments finis et représentent l'angle $0,98\Delta\beta$ où $\Delta\theta = 2 \beta_{\max}$. Le critère de minimisation χ évalue la distance entre les angles $\Delta\theta$ mesurés et $0,98\Delta\beta$ calculés, à différentes profondeurs z_2 sous le siliciure et à différentes épaisseurs t de lame.

20 - La figure 6a : épaisseur de la lame $t = 300$ nm, valeurs initiales des paramètres pris dans la littérature : $T = 410^\circ\text{C}$, $E = 150$ GPa, $\nu = 0,1$

25 - La figure 6b : épaisseur de la lame $t = 300$ nm, valeurs initiales des paramètres pris dans la littérature : $T_0 = 410^\circ\text{C}$, $E = 150$ GPa, $\nu = 0,1$.

30 - La figure 6c : épaisseur de la lame $t = 320$ nm, valeurs finales après une minimisation manuelle partielle : $T_0 = 430^\circ\text{C}$, $E = 115$ GPa, $\nu = 0,288$.

35 - La figure 6d : épaisseur de la lame $t = 320$ nm, valeurs finales après une minimisation manuelle partielle : $T_0 = 430^\circ\text{C}$, $E = 115$ GPa, $\nu = 0,288$.

 - La figure 7a est un diagramme de diffraction CBED obtenu pour une lame d'épaisseur $t = 320$ nm à la distance $-z_2 = 84$ nm de la surface.

 - La figure 7b est un profil qui a été réalisé sur la bande de Holz (5,-3,7) de la figure 7a. L'écart angulaire $\Delta\theta_g$ est marqué par 2 traits verticaux et représente la largeur de la bande de Holz.

 - La figure 7c est une simulation du profil de la figure 7b qui montre qu'il est possible de reproduire l'élargissement des lignes de Holz et les variations d'intensité $1 - A_g^2(\theta)$ dans les bandes de Holz. Cette simulation a utilisé les résultats du calcul par éléments finis qui est une illustration du point iv (constantes

élastiques optimisées et déplacement $R(y_1, z_1)$). $\Delta\theta_g$ est égal à $0,11^\circ$, ce qui correspond à une rotation d'axe x_2 d'angle $\Delta\theta = 0,14^\circ$. Dans les calculs préliminaires, on n'a pris en compte que les largeurs $\Delta\theta_g$ d'axe $x_2/[320]$. Un algorithme de minimisation plus perfectionné chercherait à reproduire les courbes similaires à 7b dans leur ensemble, avec leurs oscillations et non pas à reproduire seulement leur largeur $\Delta\theta_g$ à travers l'angle $\Delta\theta$.

- Les figures 8 à 8d illustrent un deuxième exemple expérimental, dans lequel le substrat A de silicium est surmonté d'une couche de $\text{Si}_{(1-x)}\text{Ge}_x$, puis d'une couche de Si en surface. La figure 8a montre la lame fine d'épaisseur t . Les figures 8b à 8d sont des diagrammes de diffraction " CBED " respectivement dans la direction $[230]$ à l'intérieur de la couche $\text{Si}_{(1-x)}\text{Ge}_x$, dans le substrat Si loin de la zone déformée, et dans le substrat Si près de la zone déformée.

- La figure 9 montre un organigramme d'un mode de réalisation du procédé de l'invention.

La description détaillée qui suit porte sur le cas particulier où la phase à caractériser est une couche mince, les échantillons utilisés ont une forme de lame mince avec des épaisseurs différentes, le paramètre de déformation considéré est la rotation des axes cristallins dans un plan perpendiculaire à la couche et la technique de mesure adoptée est la diffraction d'électrons à faisceau convergent (CBED).

Dans ce cas, le procédé de l'invention comporte :

- a) la réalisation d'une lame L d'épaisseur t suffisamment faible et ayant deux faces sensiblement parallèles et disposées sensiblement perpendiculairement à ladite surface de substrat ;
- b) la mesure sur ladite lame d'au moins un paramètre de déformation du substrat à différentes profondeurs par rapport à la surface ; par paramètre de déformation, on entend également paramètre de rotation du substrat ;
- c) la détermination à partir au moins dudit paramètre de déformation/rotation d'au moins un paramètre mécanique de ladite couche.

Le procédé peut comporter la réalisation de plusieurs lames d'épaisseurs différentes ainsi que la mise en œuvre de l'étape b sur chacune desdites lames. Pour au moins une dite lame, l'étape b peut être répétée à au moins deux températures différentes.

Ladite mesure est avantageusement réalisée en générant, pour des points du substrat situés à différentes profondeurs, des diagrammes de diffraction d'un faisceau électronique convergent (CBED) d'axe Z_0 désorienté par rapport à la normale à ladite lame, lesdits diagrammes comportant des lignes ou bandes de Holz. La

détermination \underline{c} peut alors comporter le relevé de la largeur des lignes de Holz d'au moins certains desdits diagrammes, pour au moins un plan cristallographique du substrat. A partir de la largeur de ces lignes de Holz, on peut calculer pour chaque diagramme une rotation maximale β_{\max} le long de l'axe du faisceau d'électrons. Cette rotation est induite par la couche (ou les couches) disposée sur le substrat et elle en caractérise les propriétés.

On peut ensuite tracer au moins une courbe représentant ladite rotation β_{\max} en fonction de la profondeur à laquelle ont été obtenus lesdits diagrammes. On peut ensuite tracer par simulation au moins une courbe représentant cette rotation en fonction de la profondeur pour des valeurs possibles des coefficients à extraire par exemple le module d'Young et/ou le coefficient de Poisson de la couche à analyser dans le cas d'une approximation isotrope et minimiser l'écart entre au moins une courbe simulée et une courbe expérimentale correspondante, pour déterminer ces coefficients. Une technique similaire pourra être utilisée dans le cas d'une modélisation anisotrope avec les coefficients connus de l'Homme du Métier. On prendra pour valeur les paramètres ayant conduit à la courbe simulée la plus proche de la courbe expérimentale.

On présentera ci-après les quatre points précités de l'invention.

point (i) : La lame mince à géométrie contrôlée est extraite ou amincie dans le dispositif. Une lame à face parallèle est préférable mais pas indispensable. Un léger angle peut être présent. On a utilisé un faisceau d'ions focalisé 'FIB', mais des procédés alternatifs, classiques en préparation d'échantillons pour la microscopie électronique peuvent être utilisés (amincissement mécanique, clivage,...) mais la technique 'FIB' a l'avantage d'être rapide et de ne pas perturber mécaniquement le système ou dispositif et de contrôler entièrement les opérations.

point (ii) : Pour mesurer les déformations, on utilise par exemple un faisceau d'électrons convergent (CBED) en mode balayage. Un faisceau électronique de taille nanométrique est focalisé en différents points de l'échantillon de façon à cartographier les déformations complètes de la lame mince (figure 3). En chaque point un diagramme de diffraction 'CBED' est donc obtenu. Ce diagramme comporte de nombreuses lignes de Holz (plus de 10 lignes) qui correspondent chacune à un plan cristallographique indexé par un vecteur g du réseau réciproque. Il est préférable d'acquérir les diagrammes 'CBED' dans le substrat (partie a), car la partie b est généralement trop fine ou trop défectueuse pour que l'on puisse acquérir de bons clichés de diffraction dans cette zone b. Mais pour certains systèmes bien cristallisés, des clichés peuvent être obtenus dans la zone a et b. Ceci serait par exemple le cas si

la couche a est du silicium et la couche b est composée de deux couches fines, une couche de $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ (composition x faible en Ge, par exemple 10%) et une couche de Si_i .

Pour une épaisseur de lame donnée et une température d'observation donnée tout un ensemble de clichés CBED est réalisé de façon à déterminer les rotations et paramètres cristallins du substrat.

point (iii) : En faisant varier l'épaisseur de lame (la technique 'FIB' permet de réaliser cela facilement) et la température d'observation dans le microscope, on obtient tout un ensemble de données expérimentales qui permettront (point iv) de calculer les constantes d'élasticité, le coefficient de dilatation de la partie B ainsi que les contraintes dans le dispositif initial non aminci. Dans le cas où la partie b est composée d'une couche homogène d'un matériau donné, il n'est pas nécessaire que les mesures soient réalisées sur une même lame successivement amincie à différentes épaisseurs. Travailler sur une lame unique augmente toutefois la précision et est indispensable dans le cas où le système est constitué d'un nanosystème (transistor par exemple) unique. Une seule épaisseur de lame ne permet pas de calculer correctement toutes les constantes du matériau. Une seule épaisseur de lame ne donne des informations que sur les contraintes du matériau (c'est le cas de l'étude de la courbure des tranches semiconductrices ou 'wafers' via la formule de Stoney). Les contraintes sont en partie relâchées par une courbure du substrat (voir par exemple : Measurement of elastic modulus, Poisson ratio, and coefficient of thermal expansion of on-wafer submicron films. Zhao, Jie-Hua; Ryan, Todd; Ho, Paul S.; McKerrow, Andrew J.; Shih, Wei-Yan. Journal of Applied Physics (1999), 85(9), 6421-6424)

point (iv) : Des simulations utilisant la théorie élastique sont ensuite effectuées pour reproduire les résultats expérimentaux. Dans des systèmes complexes seuls des calculs par éléments finis peuvent être réalisés. Dans des systèmes plus simples (partie B = couche mince) une formule analytique peut être implémentée. Les simulations reproduisent les phénomènes suivants :

- Dans le dispositif initial, les différentes parties sont contraintes ou partiellement contraintes – Le fait d'extraire une lame mince du dispositif initial relâche les contraintes sous la forme de rotation/changement de paramètres cristallins et c'est l'observation et la simulation de cette relaxation des contraintes qui nous permet de déterminer les paramètres de la partie B.

L'invention trouvera de nombreuses applications dans le traitement de surface de pièces mécaniques, d'optimisation de circuits électroniques (contact

métallique, couche d'oxyde ...) ou dispositifs où la présence de deux matériaux différents crée nécessairement des contraintes mécaniques.

Le procédé selon l'invention est original bien qu'il fasse appel à des techniques ou des effets physiques bien connus :

- 5 - la technique du faisceau d'ions focalisé ou 'FIB' (Focus Ion Beam) pour la préparation d'échantillon.
- le faisceau convergent (CBED : Convergent Beam Electron Diffraction), une technique particulière à la microscopie électronique. Le projet STREAM (voir par exemple la publication 'Software for automation of TEM/CBED
- 10 Methodology for strain determination' IST-19999-10341 STREAM Consortium - Deliverable D23) utilise une technique proche ('FIB', faisceau convergent, simulation), mais la technique mesure essentiellement des variations de paramètres cristallins alors que le procédé selon l'invention s'intéresse principalement aux rotations locales du réseau cristallin. De plus le projet STREAM ne cherche pas à
- 15 mesurer des constantes élastiques, mais à mesurer des déformations contraintes dans des circuits intégrés.

Le projet STREAM ne mesurait que des variations de paramètres cristallins loin des deux parties A et B du dispositif et négligeait la relaxation des contraintes dans la lame mince. La détection de rotation du réseau cristallin selon

20 l'invention permet d'être plus rapide, plus précis et de se rapprocher de l'interface entre les parties A et B.

La puissance du procédé selon l'invention a été montrée en analysant les déformations introduites par une couche de NiSi dans un circuit intégré (échantillon n°1, figure 2a). Ce système est relativement complexe, car il y a plusieurs

25 contacts électriques, plusieurs matériaux présents. Pour être traité rigoureusement (ce qui est tout à fait possible), il faudrait tenir compte de toutes les composantes du système.

Dans une première analyse, on a supposé que la partie B pouvait être considérée comme une couche mince de taille latérale infinie surmontée par

30 l'atmosphère (les couches situées au-dessus de la couche NiSi étaient expérimentalement décollées, l'épaisseur de la couche mince a été mesurée égale à $e=20\text{nm}$ (voir figure 2b).

On décrira ci-après de façon précise la réalisation des quatre points de la partie 3.

35 Pour cela, il faut définir différents repères géométriques.

$R_0=(x_0,y_0,z_0)$ désigne le repère géométrique lié au microscope. L'axe z_0 est parallèle à l'axe optique du microscope, défini comme étant la direction moyenne selon laquelle les électrons se propagent avant l'échantillon. Les images ou les clichés de diffraction sont enregistrés dans le plan (x_0,y_0) .

On définit également différents repères $R_c=(x_c,y_c,z_c)$, $R_1=(x_1,y_1,z_1)$, $R_2=(x_2,y_2,z_2)$, liés à la structure cristalline du substrat de silicium (partie A) :

$$x_c=[100], y_c=[010], z_c=[001]$$

$$x_1=1/\sqrt{2}[1\bar{1}0], y_1=1/\sqrt{2}[110], z_1=[001]$$

$$x_2=1/\sqrt{13}[3\bar{2}0], y_2=1/\sqrt{13}[230], z_2=[001]$$

Le repère R_2 se déduit du repère R_1 par une rotation d'axe $[001]$, d'angle $\gamma=11.31^\circ$. (voir schéma 2b). Les relations entre le repère du microscope et les repères cristallins dépendent de l'orientation de l'échantillon dans le microscope.

Point (i) : La lame mince à faces pratiquement parallèles a été réalisée avec un 'FIB' (voir remarques 1 et 2). La normale aux faces a été choisie très proche de la direction y_1 , (figure 2b) (mais ici aussi une géométrie différente pourrait être choisie : par exemple y_2). Dans la première série d'expérience, l'épaisseur t de la lame a été de $t=320\text{nm}$. Cette épaisseur a été mesurée par une technique relativement classique de faisceau convergent - voir le livre 'Electron MicroDiffraction' de J.CH. Spence et J.M Zuo (Plenum Publishing Corporation).

Remarques : 1) L'écart de parallélisme a été mesuré par faisceau convergent et perte d'énergie. Ces techniques sont relativement classiques (cf. le livre précité 'Electron MicroDiffraction' de J.CH. Spence et J.M Zuo pour le faisceau convergent et le livre 'Energy-Filtering Transmission Electron Microscopy' de Reimer publié chez Springer Verlag pour les pertes d'énergie). On a donc mesuré l'épaisseur de la lame à différentes distances de la couche supérieure. On a trouvé que la lame supérieure fait un angle de 1.15° par rapport à la lame inférieure. Dans notre démonstration de faisabilité, cet angle a été négligé et on a considéré que la lame avait des faces parallèles. Mais il aurait été possible d'introduire cet angle dans les calculs d'éléments finis.

2) Le FIB est également capable de produire des lames avec un meilleur parallélisme.

Point (ii) : Les diagrammes 'CBED' ont été pris dans (ou très proche de) la direction d'orientation $y_2=[230]$, c'est à dire que y_2 est parallèle à z_0 . C'est la direction utilisée dans le projet STREAM, (mais d'autres directions d'observation sont

également possibles. L'obtention de diagrammes CBED dans différentes directions viendrait augmenter le nombre de données expérimentales). Typiquement, la taille du faisceau électronique a été prise égale à 0,4 nm, l'angle d'ouverture du faisceau est voisin de 15mrad. Lors d'un balayage, de 50 à 100 diagrammes CBED sont pris tous les 4 nm dans une direction perpendiculaire à la surface (direction z_2), en partant de la surface, mais seulement une dizaine est retenue dans les calculs. La figure 3 indique la position selon l'axe z_2 où 5 de ces clichés expérimentaux ont été obtenus.

Plusieurs types de diagrammes CBED peuvent être définis :

a) Loin de l'interface entre les parties A et B, le substrat de silicium est, avec la précision de mesure, considéré comme non déformé (par exemple le diagramme $-z_2=300\text{nm}$ de la figure 3a). Il peut servir de référence pour déterminer les paramètres expérimentaux comme cela est fait dans le projet STREAM.

b) En se rapprochant de l'interface, les lignes de Holz restent fines mais commencent à se déplacer légèrement : les paramètres cristallins du substrat subissent de très légères modifications. C'est l'effet mesuré et quantifié dans le projet STREAM.

c) Plus près de l'interface, les lignes de Holz s'élargissent (par exemple le diagramme $-z_2=139\text{nm}$ de la figure 3a). Nous les appellerons bandes de Holz. C'est l'effet qui est mesuré et quantifié ci-après.

d) Encore plus proche de l'interface, les lignes de Holz deviennent trop larges et trop faibles : les diagrammes 'CBED' ne contiennent plus assez de détails pour être quantifiés (par exemple le diagramme $-z_2=70\text{nm}$ de la figure 3a).

Point (iii) :

Une fois cette série de mesures réalisée à l'épaisseur $t=320\text{nm}$, la lame a été amincie une nouvelle fois jusqu'à une épaisseur de $t=300\text{nm}$. Une deuxième série de mesures a alors été réalisée.

On a choisi 14 diagrammes pour la première épaisseur et 10 diagrammes pour la deuxième (voir figure 5). Ce nombre est suffisant pour reproduire les variations de la rotation.

Point (iv) :

On a utilisé le logiciel "jems" (P. Stadelmann, CIME-EPFL CH1015-LAUSANNE) pour reproduire la position des lignes de Holz des clichés CBED loin de l'interface (clichés CBED de type a), mais d'autres logiciels ou la théorie présentée dans le livre précité de Spence et Zuo pourraient être utilisés. Si l'on reporte ces lignes de Holz du substrat de silicium – le cristal de référence – sur les clichés CBED de type c, ces lignes se situent au milieu des bandes de Holz (la lame

est homogène et symétrique). Les positions d'une des extrémités de ces bandes de Holz sont simulées dans le logiciel "jems" en désorientant le cristal de référence par une rotation d'angle $-\theta_{\max}$, d'axe $x_2 // [3\bar{2}0]$ (lignes de la figure 5b). Les positions de la deuxième extrémité sont simulées dans le logiciel "jems" en désorientant le cristal de référence par une rotation d'angle θ_{\max} , d'axe $x_2 // [3\bar{2}0]$ (lignes de la figure 5b). Une rotation d'angle $\Delta\theta = 2\theta_{\max}$ permet donc de reproduire avec une bonne approximation, les largeurs $\Delta\theta_g$ variables des bandes de Holz.

Avant l'amincissement par la technique 'FIB', le substrat de silicium est contraint, mais généralement peu déformé. Après amincissement, les contraintes engendrées par l'interface entre les parties a et b sont relâchées. En chaque point de coordonnée (y_1, z_1) , les éléments finis donnent donc un déplacement $R(y_1, z_1)$ de composantes u et v sur les axes y_1 et z_1 . Ce déplacement peut être décomposé en une translation locale, une déformation pure $\varepsilon(y_1, z_1)$ et une rotation locale d'axe x_1 et d'angle $\beta(y_1, z_1)$:

$$\beta(y_1, z_1) = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial y_1} - \frac{\partial u}{\partial z_1} \right)$$

Les simulations dans le logiciel jems indiquent que ce sont ces rotations locales $\beta(y_1, z_1)$ le long du faisceau d'électrons (direction z_0) qui sont la cause principale de l'élargissement des lignes de Holz en bandes de Holz. Une rotation d'axe x_1 et d'angle $\beta(y_1, z_1)$ peut être décomposée en 3 rotations d'axe x_2 , d'angle $\theta(y_1, z_1)$, d'axe y_2 , d'angle $\theta'(y_1, z_1)$ et z_2 , d'angle $\theta''(y_1, z_1)$. Au premier ordre, seule la première de ces 3 rotations est importante et l'on a l'égalité :

$$\theta(y_1, z_1) = 0,98 \beta(y_1, z_1)$$

En particulier, on a également montré que l'angle θ_{\max} est au premier ordre égal à $0,98\beta_{\max}$, où β_{\max} est la valeur maximale de l'angle $\beta(y_1, z_1)$ le long du faisceau d'électrons, c'est à dire le long de y_2 , ou ce qui revient au même à la valeur maximale de l'angle $\beta(y_1, z_1)$ le long de la direction de y_1 puisque notre lame est périodique en x_1 :

$$\theta_{\max}(z_1) = 0,98\beta_{\max}(z_1) = 0,98 \underset{y_1}{\text{Max}}(\beta(y_1, z_1))$$

Dans cette démonstration de faisabilité, on utilise cette propriété approchée pour optimiser les constantes du matériau. Chaque diagramme CBED pris à

une profondeur z_2 est donc caractérisé par un seul paramètre $\Delta\theta(z_2) = 2\theta_{\max}(z_2)$ (figure 3b).

Les courbes de la figure 6 tracent les valeurs $\Delta\theta$ mesurées expérimentalement et les valeurs $0,98*\Delta\beta$, (avec $\Delta\beta=2*\beta_{\max}$) déterminées à partir des calculs par éléments finis.

Les courbes calculées de la figure 6a et 6b utilisent des paramètres du matériau NiSi pris dans la littérature. Pour reproduire au mieux les courbes expérimentales, on a fait varier les paramètres du matériau NiSi dans le calcul des courbes calculées des figures 6c et 6d. Par essais/erreurs, on obtient les constantes de la couche NiSi (module d'Young E et coefficient de Poisson ν (en se plaçant dans l'approximation isotrope).

On donnera maintenant quelques précisions sur l'utilisation des éléments finis. On a utilisé un logiciel du commerce. On s'est placé dans l'approximation des déformations planes.

Trois états particuliers sont importants.

état 1 : On a supposé qu'il existe une température $T_0=T_1+\Delta T$ à laquelle le substrat de Silicium et la couche de NiSi seraient cohérents, sans contrainte (cette température n'est pas forcément accessible, on pourrait la désigner comme 'la température fictive de cohérence').

état 2 : La lame mince d'épaisseur t , cohérente à la température T_0 est refroidie à la température expérimentale $T_1=T_0-\Delta T$. Les contraintes sont en partie relaxées à la surface de la lame mince.

On a utilisé les lois classiques de la mécanique des solides, pour déterminer les déplacements $R(y_1, z_1)$. En particulier la relation entre contraintes et déformations est donnée par :

$$\begin{pmatrix} \sigma_{y_1 y_1} \\ \sigma_{z_1 z_1} \\ \sigma_{y_1 z_1} \end{pmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{pmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & 1-2\nu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{y_1 y_1} \\ \varepsilon_{z_1 z_1} \\ \varepsilon_{y_1 z_1} \end{pmatrix} - \frac{E}{(1-2\nu)} \begin{pmatrix} \alpha \\ \alpha \\ 0 \end{pmatrix} \Delta T$$

où $\Delta T = T_0 - T_1$, E est le module d'Young, ν le coefficient de Poisson, α le coefficient de dilatation thermique. Ces relations s'appliquent dans le substrat de Si ($E_A=156\text{GPa}$, $\nu_A=0,277$ et $\alpha_A=2,6\text{e-}6\text{ K}^{-1}$) et dans la couche mince de NiSi (E_B , ν_B , α_B et ΔT ont été optimisés en minimisant la distance χ entre les courbes expérimentales et calculées (voir figure 6)) en utilisant l'hypothèse des déformations

planes. Les déformations sont calculées dans le plan défini par la direction des électrons incidents $y_1 // z_0$ et l'axe z_1 .

État 3 : Avant extraction de la lame, le système était beaucoup plus contraint car les contraintes ne sont pas relâchées par les surfaces. Une fois les paramètres (par exemple le coefficient d'élasticité et le coefficient de dilatation thermique) évalués, on peut grâce au présent procédé, évaluer les contraintes dans le circuit intégré avant amincissement. Les contraintes dans le transistor sont calculées en utilisant les constantes optimisées : ce sont les contraintes prises au milieu d'une lame de très grande épaisseur t_0 ou celles d'une lame périodique d'épaisseur infinie.

Remarques :

R1) Pour le point (iv), dans cette démonstration de faisabilité, on a ajusté manuellement les constantes d'élasticité, mais une optimisation automatique est possible.

R2) Pour le point (iv), nous avons également utilisé la relation approchée : $\theta_{\max} = 0.98 \beta_{\max}$, c'est à dire que l'on n'a pris en compte que la largeur totale $\Delta\theta_g$ des bandes de Holz. Un ajustage plus précis mais plus long consisterait à reproduire les bandes de Holz dans leur ensemble. Chaque diagramme CBED ne serait plus alors caractérisé par une seule valeur $\Delta\theta$ mais par un ensemble de profils identiques à ceux réalisés à la figure 7b.

Ces profils représentent en fait la fonction $1-A_g^2(s)$ où $A_g(s)$ est l'amplitude de la fonction d'onde diffractée par les plans d'indice g et s mesure l'écart à la loi de Bragg pour ces plans g . Comme expliqué dans le livre précité de Spence et Zuo, s et θ sont reliés par une formule simple et différentes approximations peuvent être réalisées pour calculer $A_g(s)$. On a montré que pour les lignes fines de Holz de diagrammes CBED pris dans la direction $y_2//[230]$, une approximation deux ondes ou une approximation cinématique donnent le même résultat physique. Dans l'approximation cinématique :

$$A_g(s, z_2) = \frac{i\pi}{\xi_g} \int_0^{\xi_g} \exp(-2\pi i g R(y_2, z_2)) \exp(-2\pi i s y_2) dy_2$$

Le paramètre à minimiser serait dans ce cas la somme des distances entre des courbes du type de la figure 7b et 7c. L'intérêt de la formule précédente est que non seulement les rotations, mais également les déformations pures sont prises en compte dans le terme $R(y_2, z_2)$ (même si on a montré que l'effet essentiel dans l'élargissement des bandes de Holz est celui dû aux rotations locales).

R3) Les points (i) et (ii) ont été également réalisés sur l'échantillon n°2 décrit dans la partie 3.

5 R4) A différentes températures, le principe de la méthode reste similaire et est relativement classique dans la mesure des déformations. Introduire des mesures à différentes températures revient à augmenter le nombre de données expérimentales et le nombre de paramètres à optimiser : la méthodologie est tout à fait similaire.

L'organigramme de la figure 9 donne une vue synthétique du mode de réalisation du procédé de l'invention qui vient d'être décrit en détail.

10 L'étape E1 du procédé est la découpe d'au moins une lame comprenant une partie du substrat et une partie de la couche disposée à sa surface. Cela entraîne un relâchement des contraintes (E2), et donc une déformation de ladite lame. A l'étape E3, au moins un paramètre de déformation (de préférence une rotation β) est mesuré en correspondance d'une pluralité de points de la lame, à différentes
15 profondeurs par rapport à l'interface couche-substrat.

D'une manière indépendante des étapes E1 – E3, on effectue une modélisation, typiquement par éléments finis, de la lame contrainte, c'est à dire avant sa découpe. Pour cela, on effectue une première estimation des propriétés mécaniques de la couche mince, telles que son module d'Young E' , son coefficient de Poisson ν'
20 et sa température de cohérence T'_0 (étape E4). Ensuite, à l'étape E5, on modélise le relâchement des contraintes. Cela peut se faire en remplaçant des conditions au contour de déplacement imposé (nul) par des conditions de contour libre. A l'étape E6 on détermine, sur la base de cette simulation, les valeurs attendues ϵ' , β' du ou des paramètres de déformation en correspondance des points où ont été effectuées les
25 mesures de l'étape E3.

De préférence, mais pas obligatoirement, les étapes E1 – E6 sont répétées pour une pluralité de lames d'épaisseurs différentes, ou plus généralement présentant une géométrie différente, et/ou à des températures différentes.

30 L'erreur quadratique moyenne entre les valeurs mesurées et attendues est calculée (E7), et minimisée par variation des estimations des propriétés mécaniques de la couche mince (E9) et itération des étapes E4 – E7, jusqu'à qu'une convergence soit atteinte (E8).

De cette façon, on obtient une estimation optimale, au sens de l'erreur quadratique moyen, des propriétés mécaniques de ladite couche (E10).

Optionnellement, l'information ainsi obtenue est utilisée, à l'étape E11, pour calculer un état de déformation et/ou de contrainte de la couche mince et/ou du substrat.

La description ci-dessus a été essentiellement limitée au cas d'un substrat sur lequel a été déposée une couche mince et à des mesures effectuées sur des échantillons constitués par une lame à face sensiblement parallèles entre elles et perpendiculaires à l'interface entre le substrat et la couche. Cependant, la méthode s'applique également à des échantillons d'une forme différente, par exemple en forme de coin. Ce qui est important est que la géométrie de cet échantillon soit connue avec précision, pour pouvoir effectuer la modélisation, et qu'elle permette un relâchement des contraintes.

De la même façon, lorsqu'on effectue des mesures sur une pluralité d'échantillons pour obtenir une meilleure estimation des propriétés mécaniques de la couche, on peut faire varier une quelconque propriété mécanique desdits échantillons, et non seulement leurs épaisseurs. Par exemple, on peut utiliser une série d'échantillons en forme de coin présentant des angles différents entre leurs faces et/ou une différente inclinaison par rapport à l'interface couche-substrat.

Comme on s'est intéressé particulièrement à la caractérisation d'une couche de surface, les différentes mesures de paramètres de déformation ont été effectuées à des profondeurs différentes par rapport à l'interface couche-substrat. Plus généralement, dans le cas d'inclusions, fibres ou filaments, on ne pourra pas parler de « profondeur », mais simplement de distance de l'interface entre les deux phases considérées. En outre, certains des points de mesure pourront, au moins dans certains cas, être situés à l'intérieur de la phase nanométrique ou micrométrique à caractériser.

En ce qui concerne la technique de mesure, d'autres méthodes que la CEBD peuvent être utilisées, comme par exemple la LACBED (Large Angle Convergent Beam Electron Diffraction : diffraction d'un faisceau convergent d'électrons à grand angle).

Dans l'exemple considéré, le seul paramètre de déformation considéré était l'angle de rotation β , déterminé par la mesure de l'élargissement $\Delta\theta$ des lignes de Holz. Le déplacement des lignes de Holz, lié aux déformations pures, aurait également pu être pris en compte. Plus généralement, le procédé de l'invention peut comporter l'utilisation d'un ou plusieurs paramètres de déformations, déterminés à partir de différentes grandeurs mesurées directement.

REVENDEICATIONS

1. Procédé pour la détermination d'au moins un paramètre mécanique d'au moins un matériau dans un système composite comprenant au moins deux phases distinctes (A, B), caractérisé en ce qu'il comporte :

5 a. la réalisation d'au moins un échantillon (L) comportant une première partie d'une première phase (A) et une deuxième partie d'une deuxième phase (B), la deuxième partie étant constituée du matériau à caractériser, l'échantillon (L) ayant au moins une dimension (t) suffisamment faible pour permettre un relâchement des contraintes dans ledit échantillon ;

10 b. la mesure, sur ledit échantillon (L) d'au moins un paramètre de déformation (β) d'au moins ladite première phase (A), en correspondance d'une pluralité de points situés à des distances différentes d'une interface entre lesdites première (A) et deuxième (B) phase ; et

15 c. la détermination, à partir au moins dudit paramètre de déformation (β), d'au moins un paramètre mécanique de ladite deuxième phase.

2. Procédé selon la revendication 1, comportant :

i. la réalisation d'une pluralité d'échantillons (L) qui diffèrent entre eux pour au moins une propriété géométrique ;

20 ii. la mise en œuvre de l'étape b. sur chacun desdits échantillons (L) ; et

iii. l'utilisation dans l'étape c. des mesures effectuées sur ladite pluralité d'échantillons.

3. Procédé selon la revendication 1 ou 2, dans lequel, pour au moins un échantillon (L), l'étape b. est répétée à au moins deux températures différentes.

25 4. Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel l'étape c. comporte :

i. la modélisation du relâchement des contraintes dans ledit échantillon (L) en utilisant une première estimation d'au moins une propriété mécanique du matériau de ladite deuxième phase (B);

30 ii. la comparaison des résultats des mesures de l'étape b. avec ceux de ladite modélisation ;

35 iii. la modification de ladite estimation d'au moins une propriété mécanique du matériau de ladite deuxième phase et la réitération des sous-étapes i. à iii. jusqu'à la minimisation de l'écart entre lesdits résultats des mesures et de la modélisation.

5. Procédé selon la revendication 4, dans lequel la modélisation est une simulation numérique par éléments finis.

6. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel ledit système composite est choisi parmi : un substrat présentant sur sa surface une couche continue, un substrat présentant sur sa surface des îlots ou des bandes de métallisation, une couche avec une zone incluse dans le substrat, un transistor, une couche à l'intérieur d'un substrat, une matrice contenant des inclusions, des fibres ou des filaments.

7. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel ledit échantillon (L) comporte au moins une dimension (t) à l'échelle micrométrique ou nanométrique.

8. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel ledit échantillon (L) est une lame ayant deux faces sensiblement parallèles et disposées sensiblement perpendiculairement par rapport à l'interface entre lesdites première (A) et deuxième (B) phase.

9. Procédé selon les revendications 2 et 8, comportant la réalisation d'une pluralité de lames (L) d'épaisseurs différentes.

10. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, dans lequel ledit échantillon est une lame disposée selon un angle par rapport à l'interface entre lesdites première (A) et deuxième (B) phase.

11. Procédé selon les revendications 2 et 10, comportant la réalisation d'une pluralité de lames disposées selon des angles différents par rapport à l'interface entre lesdites première (A) et deuxième (B) phase.

12. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel ledit échantillon est une lame en forme de coin, présentant deux faces formant un angle entre elles.

13. Procédé selon la revendication 12, comportant la réalisation d'une pluralité de lames présentant deux faces formant entre elles des angles différents.

14. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel les mesures prévues à l'étape b. sont effectuées par diffraction d'un faisceau électronique convergent.

15. Procédé selon la revendication 14, dans lequel l'étape b. comporte l'observation de lignes de Holz pour au moins un plan cristallographique de ladite première phase (A) et la détermination d'au moins un paramètre parmi : la largeur des dites lignes de Holz, leur position et leur structure interne.

16. Procédé selon la revendication 15, dans lequel l'étape b. comporte la détermination d'au moins la largeur d'au moins certaines desdites lignes de Holz et le calcul, pour chacune d'entre elles, d'une rotation maximale β_{\max} le long de l'axe du faisceau d'électrons.

5 17. Procédé selon la revendication 16, dans lequel l'étape c. met en oeuvre le tracé d'au moins une courbe représentant une dite rotation maximale en fonction de la distance par rapport à l'interface entre lesdites première (A) et deuxième (B) phase.

10 18. Procédé selon la revendication 17, dans lequel l'étape c. met également en oeuvre par simulation le tracé de courbes représentant la rotation maximale β_{\max} en fonction de la distance par rapport à l'interface entre lesdites première (A) et deuxième (B) phase pour des valeurs possibles du module d'Young et/ou du coefficient de Poisson du matériau de ladite deuxième phase (B), ainsi que la
15 minimisation de l'écart entre les courbes simulées et les courbes expérimentales pour déterminer le module d'Young et/ou du coefficient de Poisson du matériau de ladite deuxième phase (B).

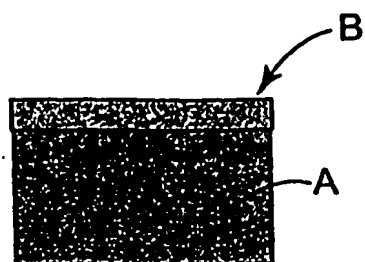


FIG. 1a

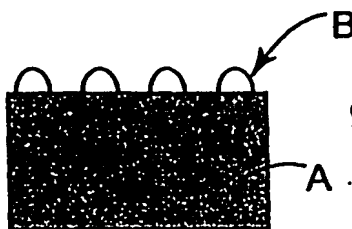


FIG. 1b



FIG. 1c

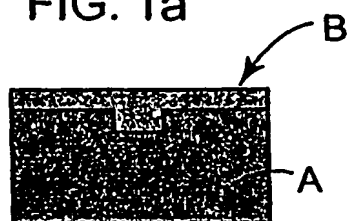


FIG. 1d

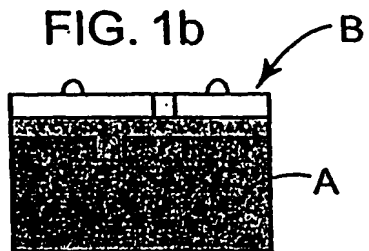


FIG. 1e

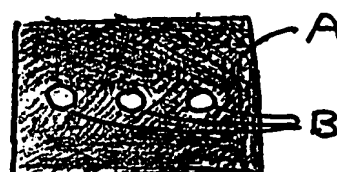


FIG. 1f

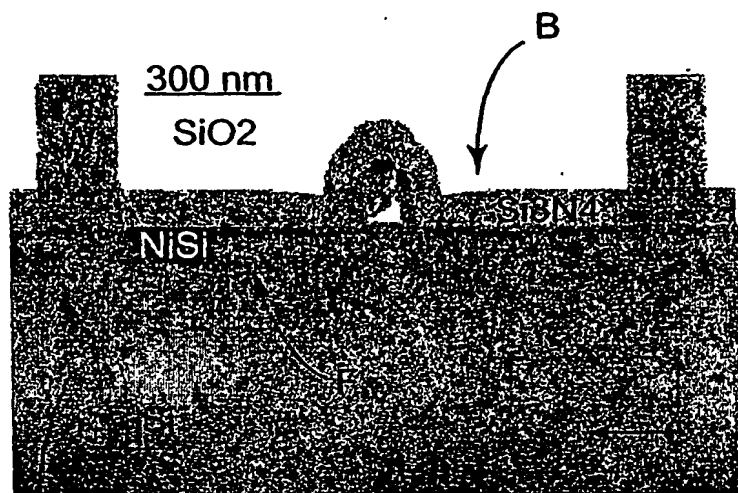


FIG. 2a

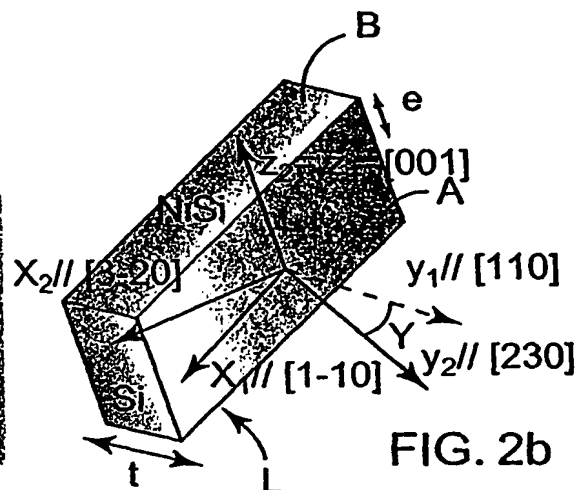


FIG. 2b

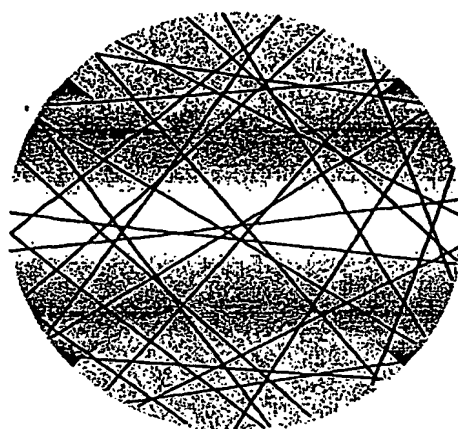


FIG. 4a

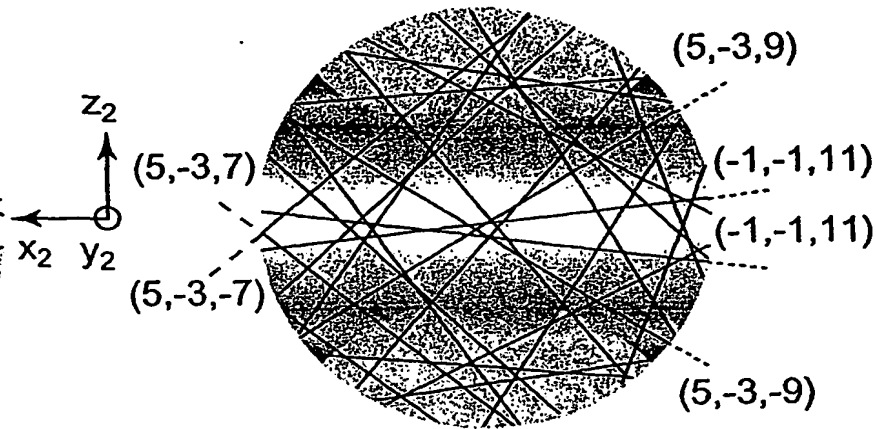


FIG. 4b

FIG. 3a

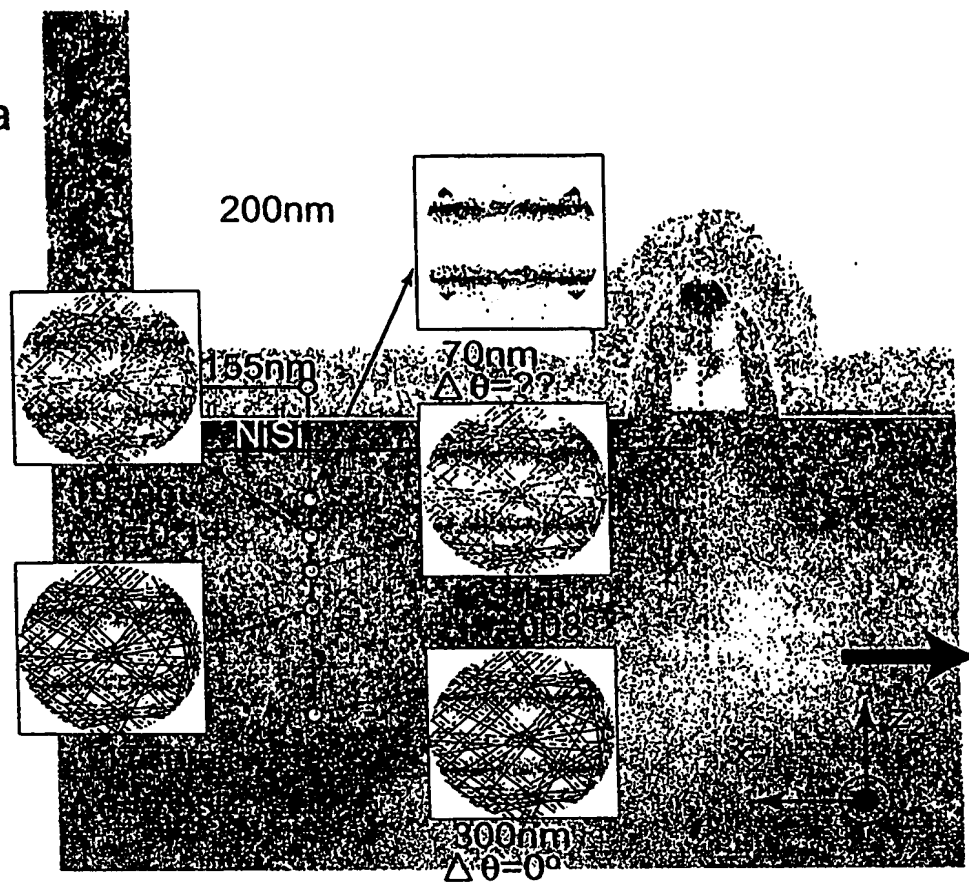


FIG. 3b

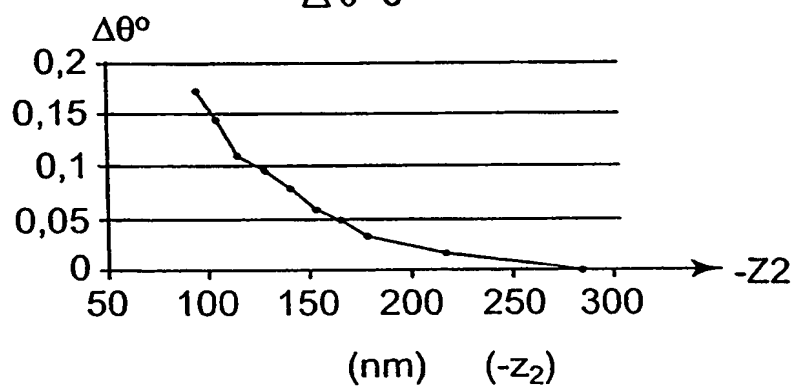


FIG. 5a

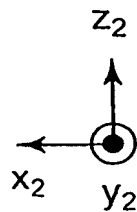
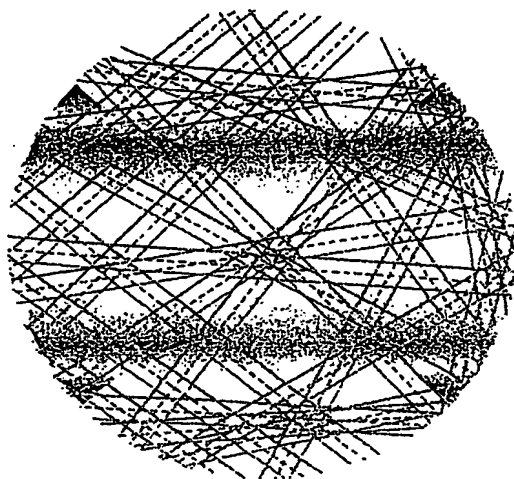


FIG. 5b

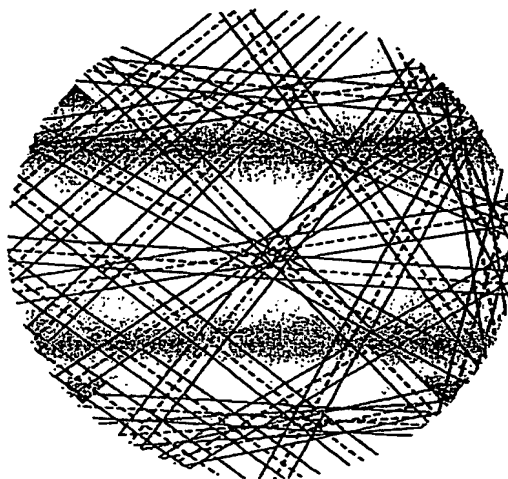


FIG. 6a

FIG. 6c

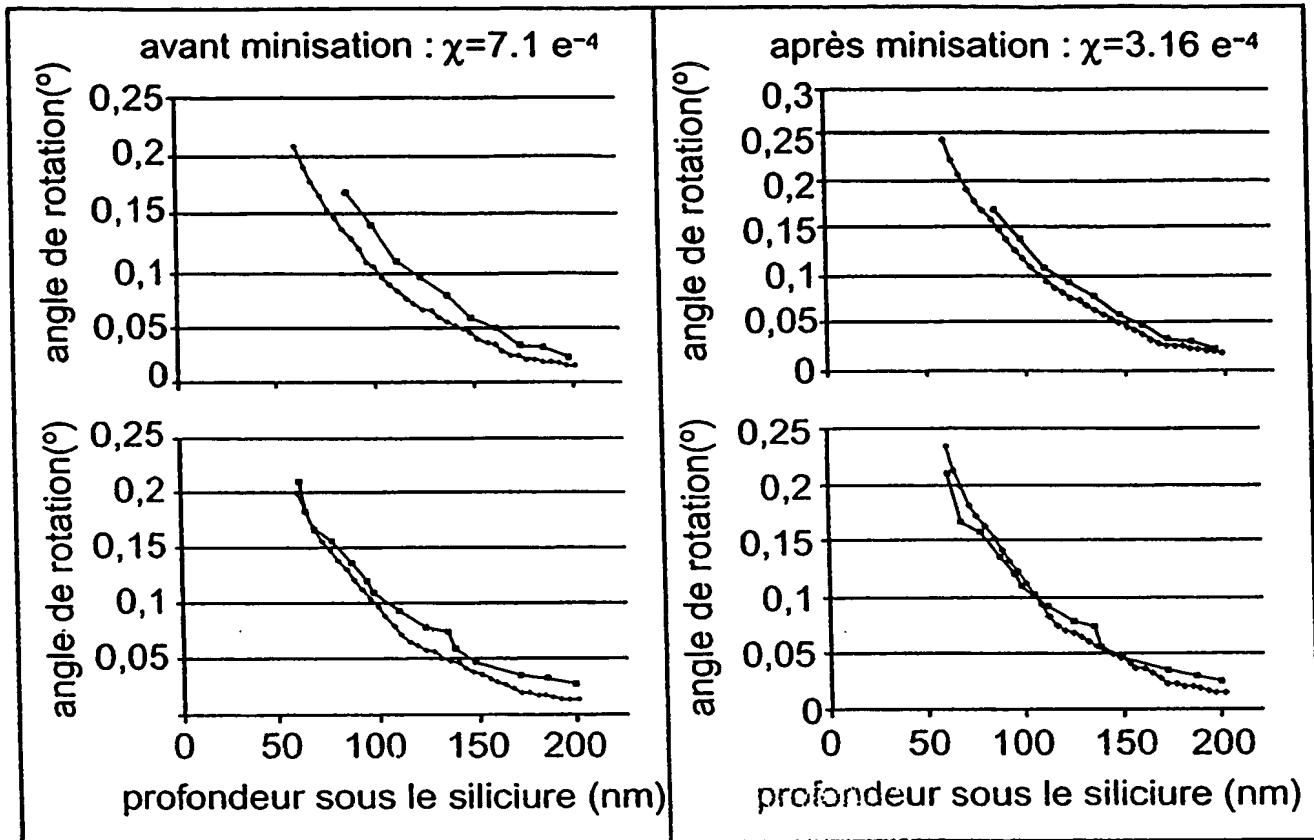


FIG. 6b

FIG. 6d

FIG. 7

FIG. 7b

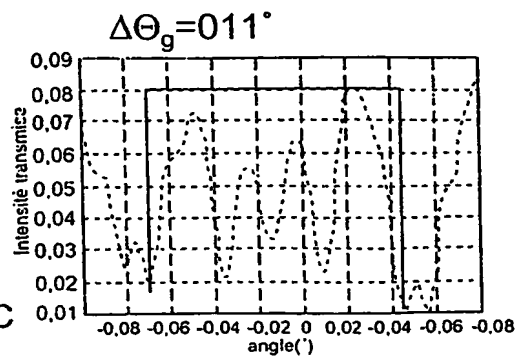
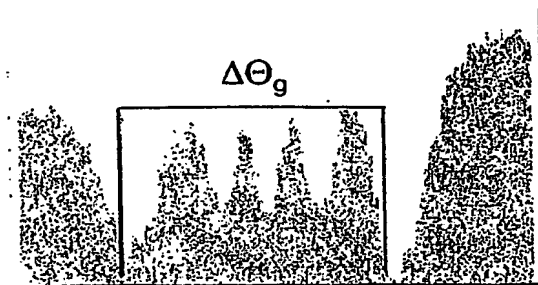
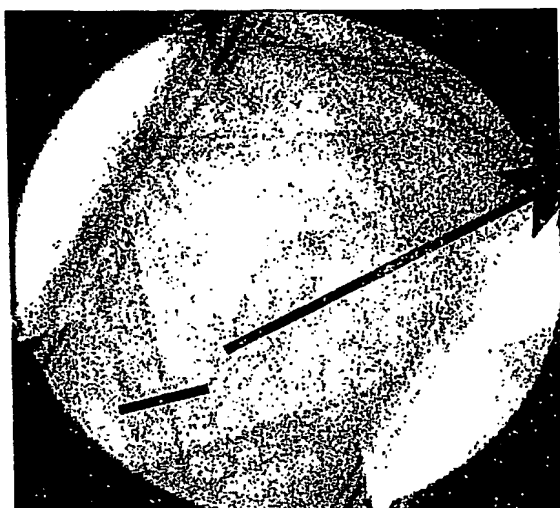


FIG. 7c

FIG. 8a

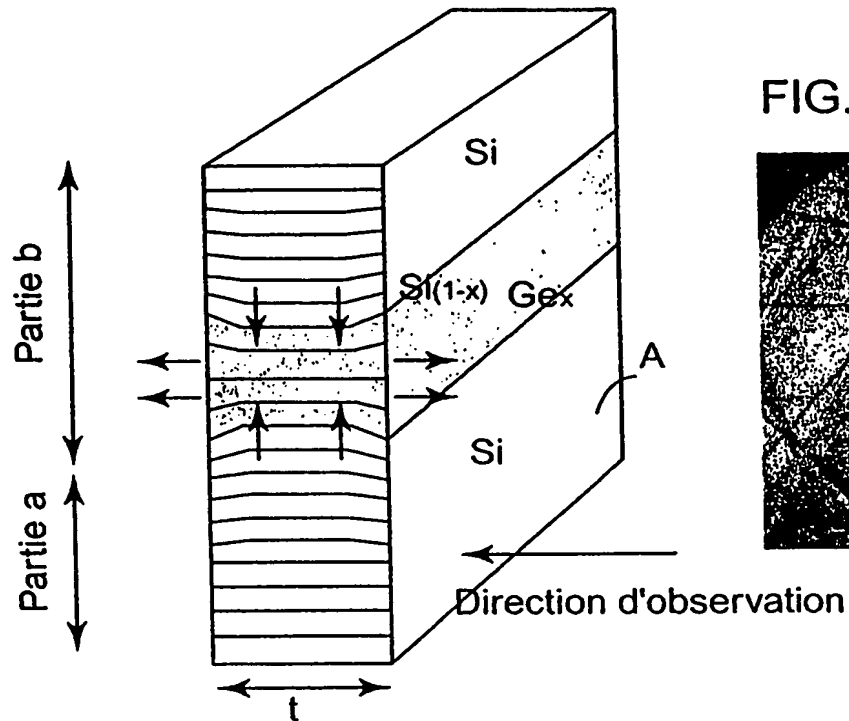


FIG. 8b

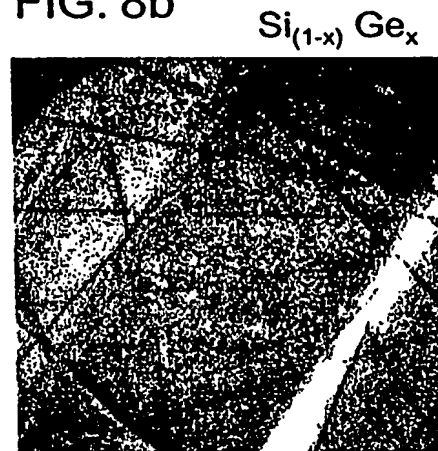


FIG. 8c

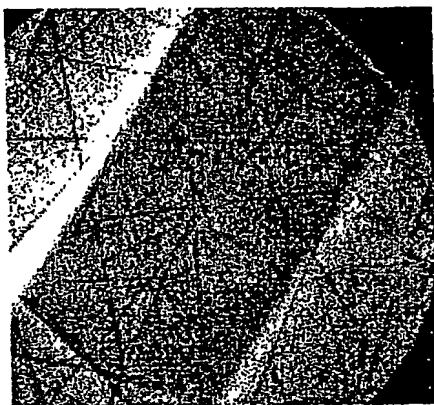
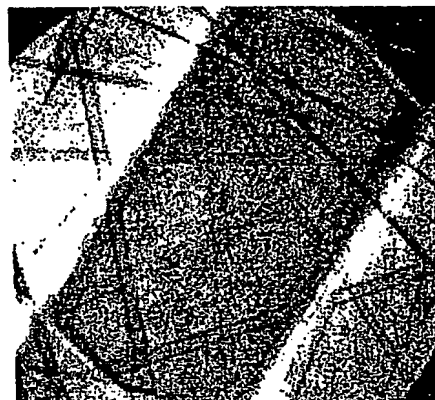


FIG. 8d



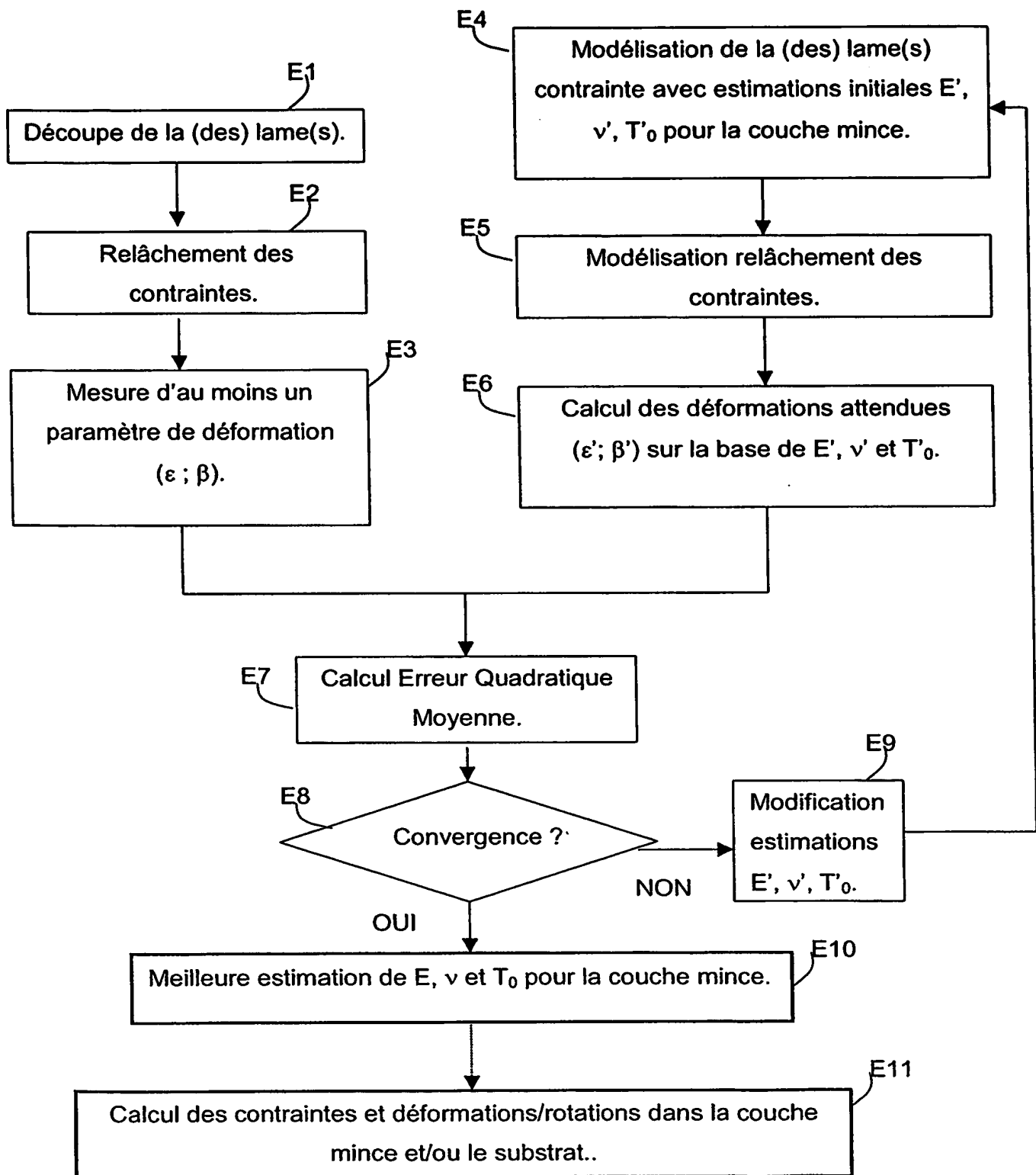


FIG. 9